

土のねじり単純せん断試験 (VI) 砂の平面ひずみねじり単純せん断試験 (その 3)

Stress-Strain Behaviour of Soil by Torsional Simple Shear Test (VI)

—Plane Strain Torsional Simple Shear Test on Sand—

福 島 伸 二*・龍 岡 文 夫*

Shinji FUKUSHIMA and Fumio TATSUOKA

1. ま え が き

前報告 (V)¹⁾ では供試体の破壊の結果現れたすべり線の観察結果について述べてきたが、ここではこのすべり線の方向と破壊時の供試体の応力状態の関係を調べ供試体の破壊条件について考察した結果について報告したい。また、Oda et al. (1974) が提案している単純せん断変形時の主応力方向の回転を表す式 $\tau_{at}/\sigma_a = \kappa \tan \psi$ について実験結果から検討を行う。

2. 供試体の破壊の条件

すべり線は何らかの条件 (破壊条件) が満たされたときに供試体に現れるものと考えられる。そこで供試体に現れたすべり線の傾きからどのような条件により供試体が破壊するのか考えてみる。土質力学でよく用いられる破壊規準は Mohr-Coulomb の規準である。これは三軸試験において最大の偏差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 、あるいは最大主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ を用いてその破壊条件を求めるとほぼ Mohr-Coulomb の規準で表現できること、また表現が簡単で実用的であることによるものと思われる。ここでは次の 2 つの条件について検討してみる。

(1) 破壊は $(\tau/\sigma)_{max}$ の方向に生じる (Mohr-Coulomb の規準)

(2) 破壊は ZERO EXTENSION ($d\epsilon=0$) の方向に生じる (Roscoe, K. H. (1979)²⁾ など)

後者の条件は金属材料の塑性論で Geiringer が Von Rises の破壊規準に Associated Flow Rule (Normality, つまり最大主応力方向と主ひずみ増分方向の一致) を適用して導いている関係である。

前報告 (V) の図 14 によると、すべり線の方向は $(\tau/\sigma)_{max}$ の方向とも ZERO EXT. の方向とも一致していないがその中間にあり、 $(\tau/\sigma)_{max}$ の方向により近い。図 17 はすべり線の方向と $(\tau/\sigma)_{max}$ の方向、ZERO EXT. の方

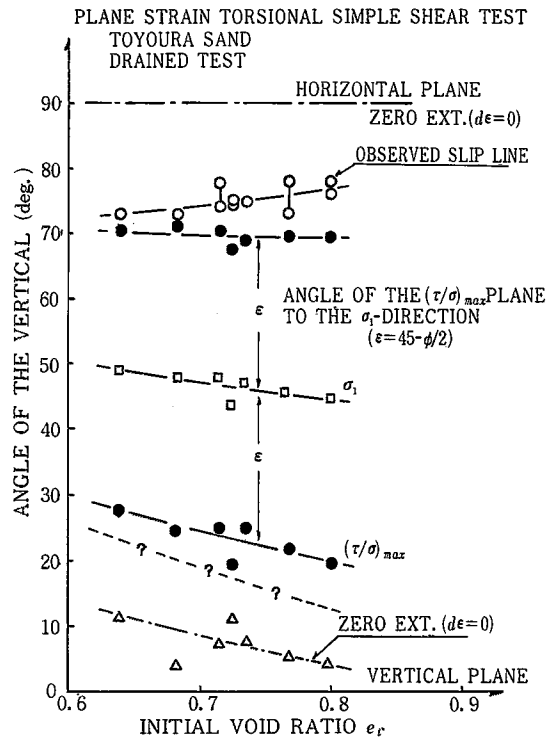


図 17 すべり線、 $(\tau/\sigma)_{max}$ 、ZERO EXT. の方向 (非水試験) 向との差をみたものである。図中の点線は σ_1 方向に対して観察されたすべり線と対称な方向を示している。これよりすべり線は完全に一致してはいないが ZERO EXT. 方向より $(\tau/\sigma)_{max}$ 方向に近いことがわかる。これは特に密な砂に言える。これより平面ひずみねじり単純せん断試験における供試体の破壊条件は供試体の初期異方性などの影響が考えられるが、すべり線が $(\tau/\sigma)_{max}$ 方向により近いこと、つまり Mohr-Coulomb の規準に近いのは、これまで多くの研究が示しているように砂が Von-Mises 的な材料でないことから当然の結果といえよう。

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

研究速報

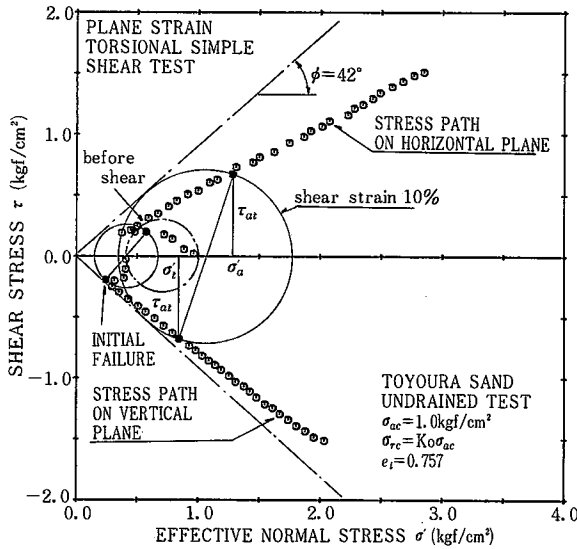


図18(a) せん断中の供試体の応力径路 (非排水試験)

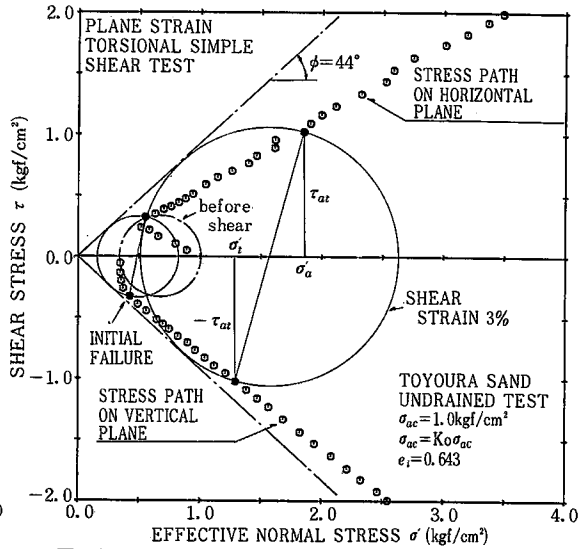


図18(b) せん断中の供試体の応力径路 (非排水試験)

以上のことは、全て排水試験に対するものであるが、非排水試験では供試体にすべり線が現れるような大きな変形まで、あるいは装置の荷容量からせん断不可能であるため排水試験と同様の取り扱いが無理である。このため供試体の応力状態をMohrの応力円で表し、これとMohr-Coulombの破壊線(せん断中の最大応力比線)を比較したのが図18である。なお、図中INITIAL FAILUREとしたのは供試体の応力状態が最初に $(\tau/\sigma)_{max}$ に達した時を表しており、図19のA点に相当する。この図から供試体の鉛直面 $(\sigma'_i, -\tau_{at})$ が水平面 (σ_a, τ_{at}) よりも常に $(\tau/\sigma)_{max}$ に近い応力状態にあることがわかる。しかしこのように供試体のある面が $(\tau/\sigma)_{max}$ に達したとしても供試体が破壊したことにはならない。それは $(\tau/\sigma)_{max}$ に達した以後(INITIAL FAILURE以後)もせん断を続ければせん断応力は増加し続けることから破壊とはいえない。したがって、非排水試験では $(\tau/\sigma)_{max}$ に達したことは供試体のある面が破壊したということではなく、その供試体のある面で最も摩擦が発揮されたことだけを意味しているといえる。

3. 小田・小西の式

Oba, N. et al (1974)³⁾は、単純せん断試験における主応力軸の回転角 (ψ) と供試体水平面上の応力比 (τ_{at}/σ_a) の関係を前報告(IV)で述べたように

$$\tau_{at}/\sigma_a = \kappa \tan \psi \quad (1)$$

で与えている(以下小田・小西の式という)。この式は単純せん断試験の応力状態を推定する上で非常に有用かつ便利な関係であると考えられる。ここでは、この式がね

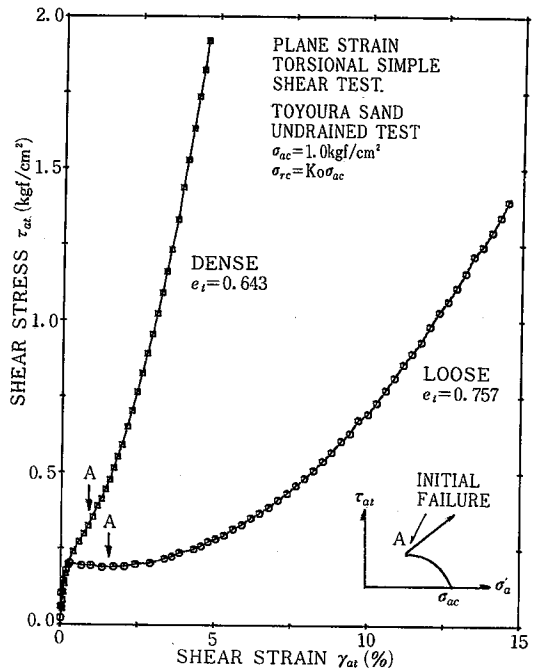


図19 応力-ひずみ曲線 (非排水試験)

じり単純せん断試験の結果をどこまで近似できるか検討したい。図20には豊浦砂の平面ひずみねじり単純せん断試験 $(\sigma_{ac}=1.0 \text{ kgf/cm}^2)$ より、求めた主応力軸の回転角 (ψ) と応力比 (τ_{at}/σ_a) の関係であり、全ての結果の範囲を実線(排水試験)と点線(非排水試験)で示してある。図中には係数 $\kappa=0.55$ と 0.75 に対する小田の式を一点鎖線で示してある。この図からわかるように小

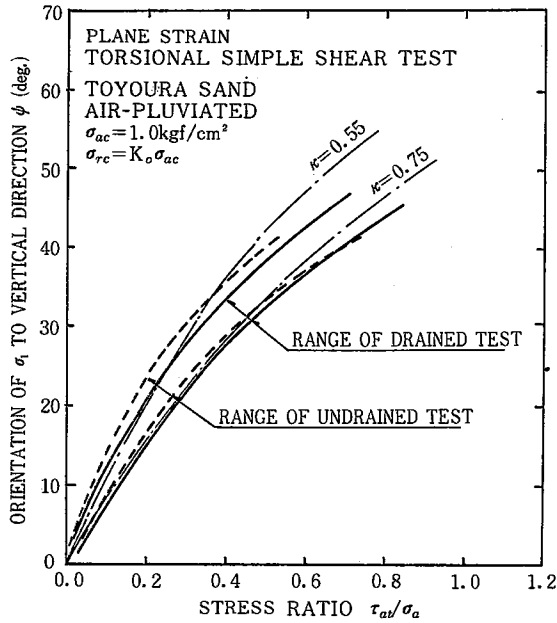


図20 ψ と (τ_{ai}/σ_a) の関係

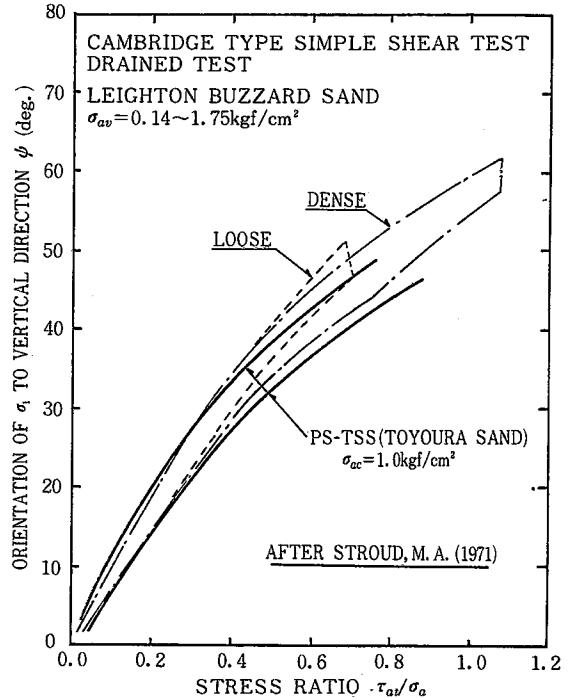


図21 平面ひずみねじり単純せん断試験と Cambridge 型単純せん断試験における ψ と (τ_{ai}/σ_a) の関係

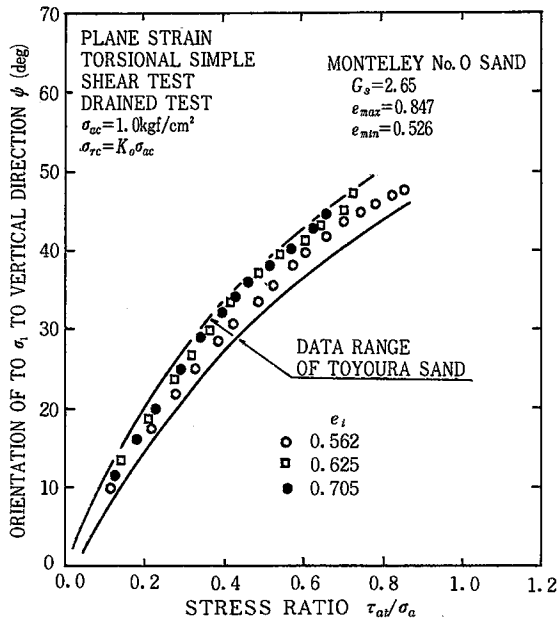


図22 Monterey No. 0 砂の ψ と (τ_{ai}/σ_a) の関係

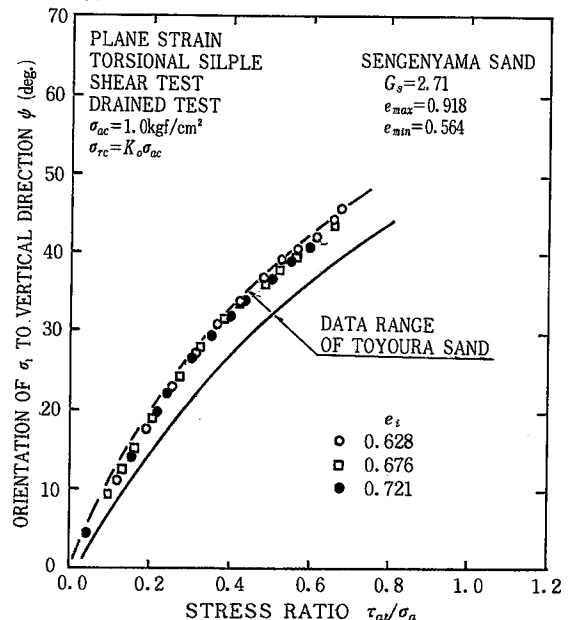


図22(b) 浅間山砂の ψ と (τ_{ai}/σ_a) の関係

田の式は ψ と (τ_{ai}/σ_a) の関係をうまく近似できることがわかるが、高い応力比の所でやや試験結果とずれている。また、試験結果は排水条件によりやや差があり、排水条件の方が小さい応力比で主応力軸の回転は小さい。

つまり小田の式の κ で表すと大きな κ に相当している。次に Stroud, M.A. (1972)⁴⁾ がまとめた Leighton Bazzard 砂の Cambridge 型単純せん断試験の結果 (排水試験) と比較したのが図 21 である。応力比の小さい領

研究速報

域では両者は差がみられないが、応力比の高い領域では豊浦砂の方がやや下方に位置している。しかし、試験装置が相違にもかかわらずかなりよい一致がみられる。このことは ψ と τ_{at}/σ_a の関係が砂によりほとんど差がなくほぼ一義的な関係があることを示唆しているようである。そこで砂の種類による差を調べるため豊浦砂以外の砂について行った試験結果を図 22(a) (Monterey No. 0 砂) と図 22(b) (浅間山砂) に示してある。どちらの砂も豊浦砂よりもやや上方に位置しているが豊浦砂の試験結果の範囲内にあり、砂の種類の違いは小さいといえるようである。以上をかなり大胆にまとめると ψ と (τ_{at}/σ_a) の関係は砂の種類、排水条件などに関係なくほとんど一義的に決まるようであり、小田・小西の式でかなりよい近似が可能である。しかし、小田・小西の式の κ で考えるならば、だいたい κ は 0.55~0.75 の範囲にあり、 κ の値は応力比の大きさ、排水条件により差がある。したがって、実際にこの関係を用いる場合には κ の決定が問題となろう。 κ の決定方法については落合⁵⁾(1975)は次のことを提案している。体積が変化せずにせん断が進行する状態、すなわち、Critical state では $d\epsilon_v \rightarrow 0$ であるから $\xi=45^\circ$ となる。主応力軸と主ひずみ増分軸の一致 ($\psi=\xi$) を仮定して、 $\psi=45^\circ$ より κ は (11) 式より、

$$\kappa = \left(\frac{\tau_{at}}{\sigma_a} \right)_{cv} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right)_{cv} = \sin \phi_{cv} \quad (12)$$

となる。また、Budhu, M. (1979)⁶⁾ は最大応力比 $(\tau_{at}/\sigma_a)_{\max}$ 時において $\psi=\xi$ を仮定して、(11) 式より、

$$\kappa = \left(\frac{\tau_{at}}{\sigma_a} \right) \cot \xi \text{ at } (\tau_{at}/\sigma_a)_{\max} \quad (13)$$

として供試体は水平面上の最大応力比とそのときの供試体の変形量より κ を求める方法を提案している。彼は、Leighton Bazzard 砂の κ を Stnud, M.A. (1972) と彼自身の試験結果を (τ_{at}/σ_a) と $\tan \psi$ の関係を直線近似してその直線の傾きより κ を求めて $\kappa=0.669$ を得ている。そして、落合の方法より $\phi_{cv}=35^\circ$ として κ を求めると $\kappa=0.575$ となり、過小評価することを示している。そして、落合の方法は ϕ_{cv} の決定に問題があることは確かである。

また、Budhu, M. は $(\tau_{at}/\sigma_a)_{\max}$ 時に $\psi=\xi$ とならないため必ずしも (13) 式の方法も合理的な方法といえないことを述べている。このような κ の方法はいずれにせよ何らかの仮定あるいは新たな物理量 (ϕ_{cv} など) を求める必要があるが、以上みてきたように、 ψ と τ_{at}/σ_a の関係は砂の種類、排水条件によらずにほぼ一義的な関係があるので実用的には目的に合わせて、例えば、応力比の小さい領域を問題にするならば $\kappa=0.55\sim 0.65$ を応力比の長い破壊近くの領域を問題にする場合には $\kappa=0.65\sim 0.75$ を選べきであろう。

結 論

砂の平面すずみねじり単純せん断試験の

(1) 供試体が破壊条件は異高情などの影響が考えられるが Mohr-Coulomb の規準に近い。

(2) せん断中の展応用比 (τ_{at}/σ_a) と主応力の回転角 (ψ) は排水条件、密度、砂の種類によらず一義的な関係がある。

(3) これらの関係は小田・小西の提案した式 $(\tau_{at}/\sigma_a) = \kappa \tan \psi$ でよい近似ができる。

(1982年5月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 福島, 龍岡 (1982): 土のねじり単純せん断試験 (V) — 砂の平面ひずみねじり単純せん断試験 (その2) —, 生産研究, Vol.34, 8号 pp.35~38
- 2) Roscoe, K.H. (1970): The Influence of Strains in Soil Mechanics, Geotechnique, Vol. 20, No. 2, pp. 129~170
- 3) Oda, M. and Konishi, J. (1974): Rotation of Principal Stresses in Granular Material during Simple Shear, Soils and Foundations, Vol. 14, No. 4, pp. 39~53
- 4) Stroud, M.A. (1971): The Behaviour of Sand at Low Stress Levels in the Simple-Shear Apparatus, Ph.D. Thesis, Cambridge Univ.
- 5) 落合 (1975): 直接せん断試験における砂の挙動, Soils and Foundations, Vol. 15, No. 4, pp. 93~100
- 6) Budhu, M. (1979): Simple Shear Deformation of Sand, Ph.D. Thesis, Cambridge Univ.